

集束イオンビームを用いたミクロンスケール領域での 加工及び組み立て

田中 武雄*, 藤原 誠**, 源内 規夫**, 志水 一平***

Micrometer-scale fabrication and assembly using focused ion beam

TANAKA Takeo, FUJIWARA Makoto, GENNAI Norio and SHIMIZU Ippei

Abstract

As nanotechnology advances, fabrication techniques based on focused ion beams (FIB) are expected to be useful in manufacturing complex microstructures. We developed a micro-manufacturing method with superior micro-assembly capability by employing FIB milling, FIB-assisted deposition, a rotational-type side-entry stage, and a micro-sampling system. After being machined by FIB milling, micro-samples were assembled into a 25- μm -diameter micro universal joint. A 1- μm -diameter micro-joint was also successfully manufactured in the same manner. Results of TEM observation of the interface between the deposited layer and the substrate suggest that FIB-assisted deposition can be applied to the formation of micro-joints in a micro-machine manufacturing process. This micro-manufacturing method is a powerful tool for the fabrication and assembly of micro-machines.

1. 緒 言

FIB技術は、マスクレスリソグラフィ技術 [1], マスク補修 [2], 集積回路補修 [3], 微細加工 [4-6], 三次元構造の形成 [7], 微小電気機械システムセンサーの組み立て [8] 及びTEM観察用薄片試料の加工などに用いられている。それらの過程では、FIBスパッタリング及びFIB支援蒸着など優れた機能が利用されている。我々はこれらの機能をうまく利用し

2006年3月14日 原稿受理

*大阪産業大学 工学部機械工学科

**大阪産業大学 新産業研究開発センター

***大阪産業振興機構

た複雑形状を有する微細構造加工プロセスの開発に取り組んでいる。この技術は、近年、ナノテクノロジー分野の進歩に伴うナノメーター及びマイクロメータースケールの部品開発が可能となっている中で、さらに微細構成物形成技術としてFIBの新しい応用法を提案するものである。

本報では、本来、TEM試料のピックアップ技術として使われてきたマイクロサンプリング技術を利用することによって、複雑な微小機械部品の加工及びマイクロマシンの組み立てを可能にしたFIB新規技術について報告する。

2. 実験方法

2.1 FIBシステム

本研究では、TEM観察用に極めて高い精度でのマイクロサンプリングシステム能力を持つ市販のFIB装置（日立ハイテクノロジー社製FB-2000A及びFB-2100）を使用した。このマイクロサンプリングシステムは微細試料の取り回しや組み立てにおいて重要な役割を果たす。用いたFIB装置にはGaイオンビームが設けられている。両装置の仕様を表1に示す。

表1 FB-2000A 及び FB-2100FIB システムの仕様

FIB system	FB-2000A	FB-2100
Accelerating voltage	30 kV	10-40 kV
Maximum beam current	13 nA and above	30 nA
Maximum beam current density	15 A/cm ² and above	25 A/cm ²
Image resolution	10 nm	6 nm

2.2 FIBによる微細加工

FIBによる微細加工実験試料として直径25 μ mのAlワイヤを使用した。回転型サイドエントリーステージをFIBによる微細加工のためのステージとして使用した。このステージは、図1に示すようにステージ軸に沿って360°回転可能であり、前後及び半径方向に操作可能である。サンプリングシステムに付属しているマイクロプローブもまたX、Y及びZ方向に動かすことが可能であり、結果としてこのシステムは6自由度を有している。FIB支援蒸着技術はマイクロプローブの先端部を試料に接合する場合などに使用した。また、同様の手法で微小試料同士を接合するために用いた。このようにFIB支援蒸着技術は高い精度での試料の操作と複雑な位置合わせを可能にしている。支援ガスの原料材としてW(CO)₆とC₁₆H₁₀を使用した。FIB組み立てプロセスの観察には走査イオン顕微鏡を使用した。

蒸着界面については微小エネルギー分散型X線分光器付き200kV走査型透過電子顕微鏡（日立ハイテクノロジー社HD-2000）を用いて評価を行った。TEM観察用の厚さ約100nmの薄片試料を作成する際にもFIBを用いた。

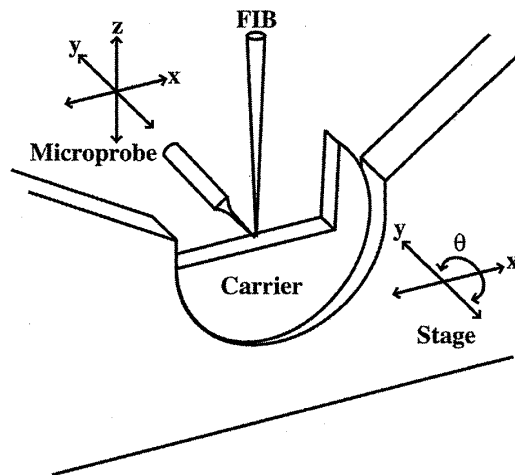


図1 回転型サイドエントリーステージ及びマイクロサンプリングシステムの概略図。これらのシステムを駆使することにより FIB 加工において 6 自由度を実現した。

3. 結果, 及び考察

3.1 FIB微細加工における基本プロセス

図2に示すように、まずはじめに、FIB技術を用いてマイクロマシン組み立てが可能であるかどうかを検証するために、直径 $25\mu\text{m}$ のAlワイヤの加工とハンドリングについての実験を行った。その工程は次のようなプロセスを基礎としている。

図2(a)に示すように、FIBによりAlワイヤから切り出された微小パーツは、微小試料を操作するためにFIB支援蒸着を用いてマイクロプローブ先端に接合した。試験片が極めて小さいためピンセット等による操作は不可能であるため、この操作は微細試料の取り扱いにおいて重要となる。その後、図2(b)に示すように、この微細試料をステージ上に移動させ、試料とステージをFIB支援蒸着によって接合して固定した。この作業により約 $1\mu\text{m}$ 程度の幅の微小

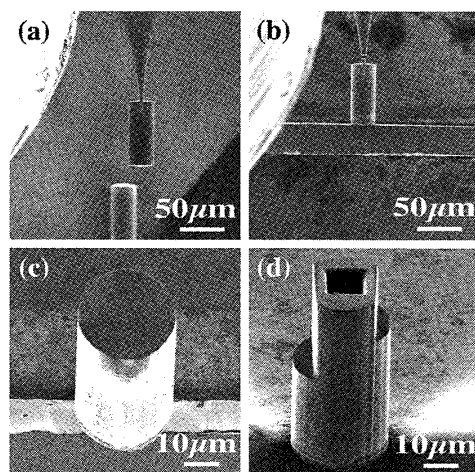


図2 直径 $25\mu\text{m}$ の高純度AlワイヤにおけるFIB加工の基本操作；(a) ミリング及び取り回し, (b) キャリアによる再ポジショニングと設置, (c) 分離, (d) 切削

な溶接層が形成された。次に、図 2 (c) に示すように、FIBミリングにより試料片からマイクロプローブ先端を分離した後、図 2 (d) に示すようにステージを回転させてFIBミリングにより微細試料を三次元構造に加工した。より複雑な形状をもつ微細加工物についても前述のような工程の組み合わせと繰り返しにより加工が可能であることがわかった。

3.2 複雑微小機械の組み立て

さらに複雑な三次元構造の加工と組み立ての工程を図 3 に示す。この実験も前述と同様に直径 $25\mu\text{m}$ のAlワイヤを用いて評価した。この実験では、三次元構造についてはマイクロメータースケールの超微小ユニバーサルジョイントを想定し、FIBマニピュレータを用いた微小パーツの組立ができるかどうかの検証を重点に進めた。図 3 の組み立て工程については、次のプロセスを基礎としている。

図 3 (a) に示すように、ジョイントヨークを通すため、直径 $6\mu\text{m}$ のソケットホールをFIBミリングによりドリリングした。図 3 (b) は、幅約 $10\mu\text{m}$ 、長さ約 $30\mu\text{m}$ の矩形柱状形状のスパイダーの加工工程で、スパイダーピンが通るように直径約 $6\mu\text{m}$ の穴を二つ開口した。その後、図 3 (c) に示すように、ジョイントヨーク内にピンをマニピュレートして取り付け、ヨーク上の穴とピンを慎重に位置合わせした。このとき、位置精度は、数 100nm の精度が得られているものと考えられる。さらに、図 3 (d) 及び(e) に示すように、スパイダーピン穴に、別のパーツとしてAlワイヤから直径約 $5\mu\text{m}$ 、長さ約 $25\mu\text{m}$ のシャクルピンを切り出して挿入した。最後に、図 3 (f) に示すように、すべてのシャクルピンをヨーク内にはめ込み、長さ約 $200\mu\text{m}$ の超微細ユニバーサルジョイントの組み立てが完成した。完成品の全体図を図 4 に示す。

この超微細ユニバーサルジョイントの総重量は、計算で約 265ng である。スパイダーピンと

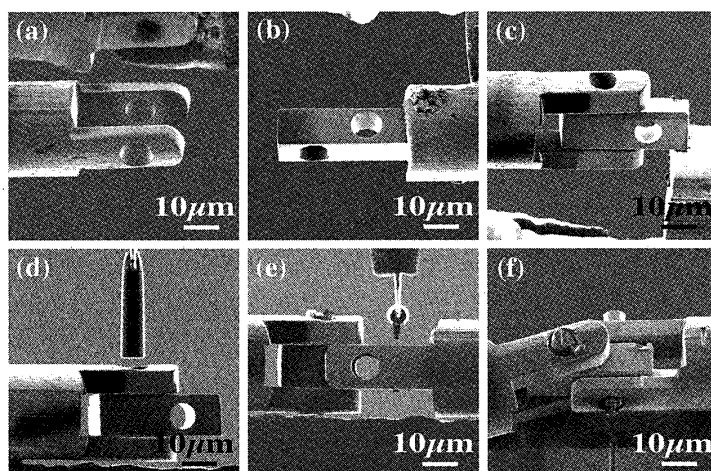


図 3 複雑なマイクロマシンの組み立て；(a) 直径 $25\mu\text{m}$ のジョイントヨーク加工，(b) 矩形コラム加工，(c) 微小部品の位置合わせ (d and e) マイクロピンの差し込み，(f) マイクロユニバーサルジョイントの完成。

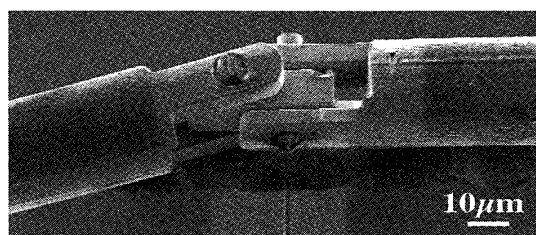


図4 完成した25 μm スケールのマイクロユニバーサルジョイントの外観。

シャクルピンの計算重量はそれぞれ、8 ng及び1 ngである。これらの超微小試料は他の構造物に対し、吸着しやすいためピンセット等を用いたこれらの操作は極めて困難である。この問題は微小試料のサイズが小さくなれば小さくなるほど静電力、表面張力、ファンデルワールス力が重力と比較して支配的になるため発生する [10]。FIBマイクロサンプリングシステムとFIB支援蒸着技術を組み合わせることによりこの問題を克服することが可能となり、本研究によりFIB技術がマイクロマシン作製における強力な組み立てアイテムであることが実証された。

さらに、図5に示すように、上記と同様の方法で1 μm サイズの、より小さなマイクロマシンを作製することができた。図5 (a) は、約1 μm 幅のAlロッドの両端に、それぞれ、直径約500nmの微小ホールを開口したもので、アームの二つの微小ホールの開口方向は直角をなしている。図5 (b) に示すように、同じサイズの微小ホールを開口したもう一方のアームに、(a)のアームをマニピュレートして穴位置合わせを行った。図5 (c) に示すように、位置あわせされた二つのアームの穴に、直径500nm以下の小さなピンを通して微細リンク（マイクロジョイント）を組み立てることができた。以上のように、FIB技術を用いることによりナノスケールの部品加工と組立操作が可能であることを実証することができた。

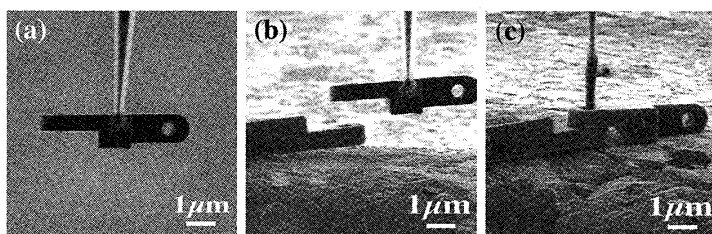


図5 直径1 μm のマイクロジョイントの組み立て；(a)穴径500nmのホール開口，(b)操作 (c) マイクロピンの嵌め込み。

3.3 イオン注入及びカーボン蒸着

マイクロサンプリング作業時にFIB支援蒸着及びGaイオン照射によって引き起こされる組成変化ならびに構造変化 [9] は避けられない。それゆえ基板と微細試料の蒸着層との間の界面におけるそれらの影響を調査することは重要である。図6に微細試料の多結晶Al基板と蒸着カーボン膜との界面領域の断面を観察した際のTEM像、及びマイクロEDSのスペクトルを示

す。比較として図7に基板材にSiウエハを使用した場合のTEM像を示す。カーボン蒸着膜はそれぞれのTEM像において明確に識別することができる。基板材という観点から見てみると、格子像が結晶構造に起因するものであることからこのTEM像はカーボン蒸着膜が非晶質層から構成されていることを示唆している。それゆえ、カーボン蒸着膜と基板との間にある二つの中間層から成る構造は図6及び図7の両方において異なる強度のコントラストでその領域内に観察される（片方の中間層は20~30nmの厚さの帯状の構造、他方は40~50nmの幅のしみ状の構造）。後者はAl基板（図6）とSi基板の場合においてそれぞれ約6~10nmサイズの多数の小

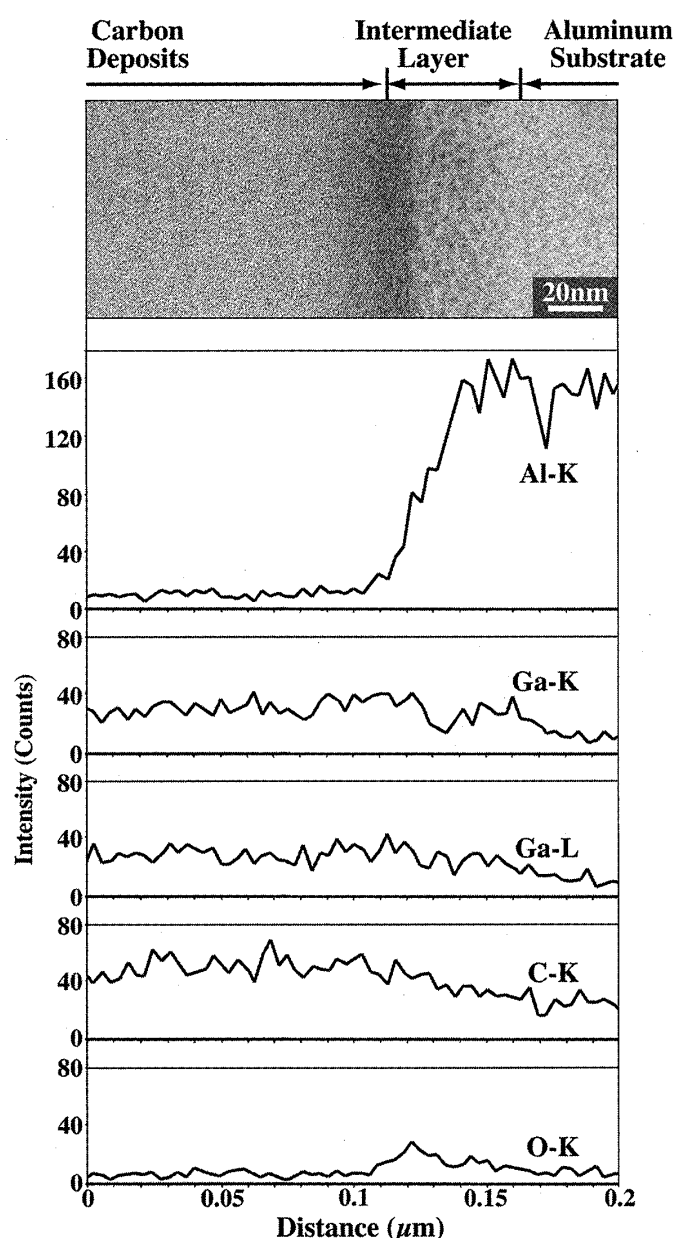


図6 Al基板-C蒸着膜間界面近傍の透過電子像及びマイクロEDSによるライン分析スペクトル。

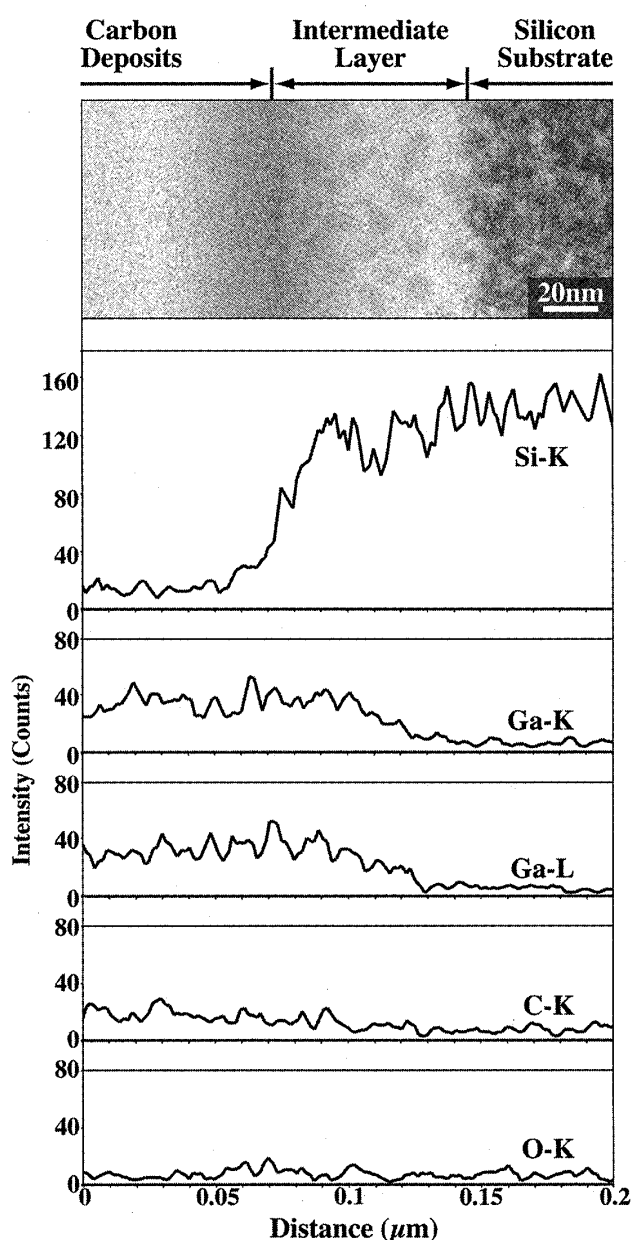


図7 Si基板及びC蒸着膜界面近傍の透過電子像及びマイクロEDSによるライン分析スペクトル。これらの結果は図6に示したAl基板の場合の結果との比較のため評価した。

小さな黒いドット状の模様を有している。

マイクロEDSスペクトルは表面側のカーボン蒸着層は主にカーボンにより構成されていることを示しているが、Ga-K線、Ga-L線も比較的高いX線強度を示していることから、Ga濃度も相対的に高い組成をもつことが示唆される。AlもしくはSiの基板元素は基板からこの帯状の組織領域に存在している。Gaの含有量が最も高いのはこの帯状の領域に観られ、基板方向に徐々に減少している。FIB支援カーボン蒸着の初期段階ではGaリッチ層が形成されたことを示唆している。帯状組織中のC含有量は蒸着層よりも少なく、しみ状組織においては無視できるレベルであった。これらの中間層中において酸素の存在が検出され、帯状組織部では他の領域よりわずかながら酸素含有量が高くなっている。このようにこれらの中間層において酸化物の存在は母材の表面によるものと考えられる。これらの結果はGa注入層がFIB加工中に形成されたことを示唆している。しかしながら、境界領域における中間層に関するより多くの詳細な情報を得ることは難しい。TEM観察による、しみ状組織における小さな黒いドット、及びそれらのマトリクスから明確な結晶構造を観察することもまた困難であった。ドット状組織からの微小回折パターンは非晶質層形成に起因するハローリングを示した。

これらのTEM観察の結果は基板/蒸着膜界面が連続状態であることを示している。FIB支援蒸着によって形成された接合部は操作中に剥がれることが無かったように十分な密着強度を持っている。微小試料における、この優れた密着性は微小组織に観られたこの連続組織に基づいているものと推測される。従って、FIB支援蒸着法はマイクロマシン加工プロセスにおける微小接合に応用可能であるといえる。

4. 結 言

我々はFIB技術を用いて複雑な微小構造物の組み立てのための新しいプロセス開発を行い、その有効性を立証した。我々はFIBミリング及びFIB支援蒸着、回転型サイドエントリーステージ及びマイクロサンプリングシステムを使用することによって得られる優れたマイクロアッセンブリ能力を用いて微小構造物製作手法を開発した。FIBミリングにより加工した後、微小試料は直径25 μm のユニバーサルジョイントならびに直径1 μm のマイクロジョイントに組み立てた。ナノスケールの加工成形とFIB技術を用いた操作を立証した。FIB支援蒸着法によって形成された接合部は操作時に剥がれることなく、十分に高い密着性を示した。蒸着膜と基板界面におけるTEM観察では非晶質カーボン層と中間層が形成されていることが明らかになった。TEM観察の結果は微小组み立て工程におけるFIB支援蒸着法を微小接合部形成に応用できることを示唆した。この微小组み立て技術はマイクロマシンの加工と組み立てに対し、効果的な手法であった。

<参考文献>

- [1] R. L. Seliger and P. A. Sullivan, Reg. Tech. Conf. Photopolym. 1979 (1979) 225.
- [2] L. R. Harriott, Appl. Surf. Sci. 36 (1989) 432.
- [3] Y. Eu, N. K. A. Bryan, O. N. Shing : Sensors and Actuators A 88 (2001) 58.
- [4] T. Ishitani, T. Ohnishi and Y. Kawanami : Jpn. J. Appl. Phys. 29, 10 (1990) 2283.
- [5] M. J. Vasile, R. Nassar and J. Xie : J. Vac. Sce. Technol. B 16, 4 (1998) 2499.
- [6] D. P. Adams, M. J. Vasile, G. Benavides, A. N. Campbell : Precision Eng. 25 (2001) 107.
- [7] J. Fujita, M. Ishida, T. Ichihashi, T. Sakamoto, Y. Ochiai, T. Kaito and S. Matsui : Jpn. J. Appl. Phys. 41 (2002) 4423.
- [8] F. P. Stratton, R. L. Kubena, H. H. McNulty, R. J. Joyce and J. Vajo : J. Vac. Sci. Technol. B 16, 4 (1998) 2449.
- [9] M. Tanaka, K. Furuya and T. Saito : Jpn. J. Appl. Phys. 37 (1998) 7010.
- [10] H. Miyazaki and T. Sato : Int. Conf. on Micromechanics for Information and Precision Equipment, 20-23 (1997) 335.